

УДК 629.735

**А.С. КОЛЯДЮК**, вед. інженер ІПМаш НАН України, Харків;  
**Н.Г. ШУЛЬЖЕНКО**, д-р техн. наук; проф. ІПМаш НАН України, Харків

## АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЯ ПАРА ЧЕРЕЗ СИТО РЕГУЛИРУЮЩЕГО КЛАПАНА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ К-325 НА СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ РОБОТЫ

Рассматривается течение пара в системе парораспределения на основе численного решение уравнений Навье-Стокса. Определяются характеристики течения пара. Применяется модель турбулентности  $k-\omega$  SST Ментера. Установлены основные особенности течения пара через сито и в камере, где оно установлено.

**Ключевые слова:** расчет, течение пара, система парораспределения, турбина.

### Введение

В настоящее время существует потребность в повышении рабочих характеристик и надежности системы парораспределения турбин. Это связано с модернизацией паровых турбин, при которой требуется увеличить пропускную способность системы парораспределения. Для этого необходимо решение задач течения пара с учетом всех конструктивных особенностей регулирующих клапанов.

Система парораспределения паровой турбины регулирует или предотвращает подачу пара в проточную часть. Ее конструкция состоит из трех отдельно работающих клапанов, выполненных в одном корпусе. Стопорный клапан (СК) выполняет функцию полного перекрытия подачи пара в турбину, подача пара регулируется клапанами РК1, РК3. При этом РК1 и РК3 всегда открыты по разному. Перегретый пар подается в систему парораспределения под давлением 24 МПа с температурой 540 °С.

В работах [1, 2] впервые были получены результаты численного решения уравнений течения пара и теплопроводности регулирующего клапана паровой турбины К-325 для различных режимов работы турбины с учетом влияния сита. Сито представляет собой цилиндрическую обечайку с 3024 отверстиями, что приводит к большой размерности задачи. Для снижения размерности задачи сито можно заменить пористым телом. Для построения модели пористого тела необходимо рассмотреть течения пара через сито и получить значения распределения расхода пара и перепада давления на сите. Особенно это актуально при решении многовариантных задач течения пара на нестационарных режимах работы.

При решении совместной задачи течения пара и теплообмена [2] впервые

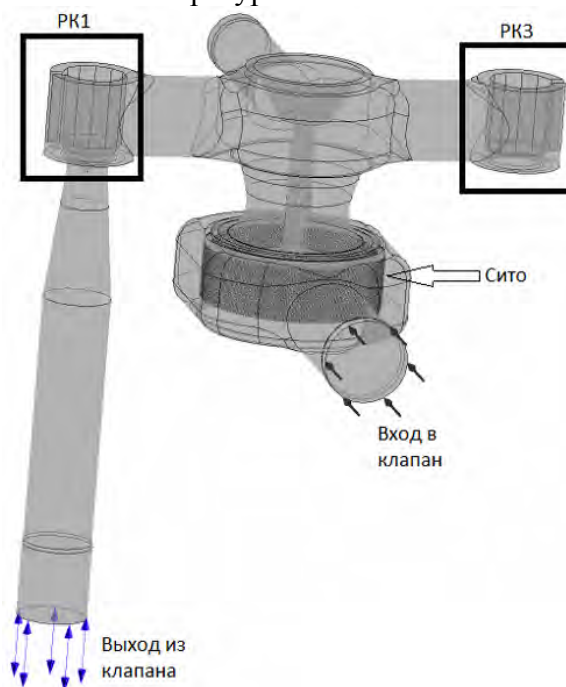


Рис. 1 – Пространственная схема проточной части регулирующего клапана

© А.С. Колядюк, Н.Г. Шутьженко, 2013

было выявлено повышение температуры сита по сравнению с температурой пара на входе в клапан при работе турбины на мощности 100 МВт. На этом режиме работы РКЗ закрыт полностью. В данной работе рассматривался стационарный режим, отвечающий мощности 100 МВт, представляющий наибольший интерес по результатам решения задачи с учетом влияния сита [2].

#### Описание математической модели

Использовалась математическая модель потока пара, реализованная в программном комплексе *ANSYS/CFX* [2]. В ее основе лежат осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса для вязкого сжимаемого теплопроводного газа. Они представлены уравнениями неразрывности, изменения количества движения и сохранения энергии

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) &= 0; \\ \frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) &= -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right]; \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho h_{tot}) - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j h_{tot}) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_j \tau_{ij}),\end{aligned}$$

где  $t$  – время;  $x_i, x_j$  – декартовы координаты;  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $U_i, U_j$  – компоненты скорости;  $T$  – температура;  $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$  – эффективная вязкость;  $\mu, \mu_t$  – коэффициенты динамической и турбулентной вязкости;  $p' = p + \frac{2}{3}\rho k + \frac{2}{3}\mu_{eff} \frac{\partial U_m}{\partial x_m}$  – модифицированное давление;  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  $h_{tot}$  – полная энтальпия;  $c_p$  – теплоемкость при постоянном давлении;  $\tau$  – эффективные напряжения,  $\lambda$  – теплопроводность.

Для перегретого пара используется уравнение состояния Менделеева-Клапейрона.

Для статистического моделирования влияния турбулентности и описания турбулентного пограничного слоя на твердых поверхностях применяется (одна из используемых в *ANSYS/CFX*) полуэмпирическая модель  $k-\omega$  SST Ментера [4, 5]. Данная модель, комбинируя достоинства классических моделей « $k-\epsilon$ » и « $k-\omega$ », обеспечивает достаточную точность результатов и эффективную сходимость итерационного процесса даже при относительно грубых сетках и умеренном разрешении пограничного слоя [6]. Система исходных уравнений модели имеет вид

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i k) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \beta^2 \rho k \omega + P_k; \\ \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] - 2(1-F)\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_3 \rho \omega^2,\end{aligned}$$

где  $\alpha_3, \beta_3, \sigma_{k3}, \sigma_{\omega 2}, \sigma_{\omega 3}$  – коэффициенты;  $\omega$  – удельная скорость диссипации;  $P_k$  – производство турбулентности.

Граничными условиями являлись расход и температура пара на входе в систему парораспределения и давление за РК1. Теплообмен через стенки корпуса не учитывался. На выходе учитывалось возможность обратных течений. Разностная сетка состояла из 33 млн. элементов и 9 млн. узлов с пятью ячейками в пограничном слое.

### **Анализ результатов**

В результате расчетов были получены скорости и давление пара в клапане. Задача сходилась после 2000 итераций. Расчет одного режима работы клапана с учетом сита на компьютере с процессором *INTEL i7* при 24 Гб оперативной памяти занимал около 100 часов.

Установлены основные особенности течения пара через сито в клапане. Для удобства анализа результатов сито условно разбивалось на 6 одинаковых секторов, как показано на рисунке 2. Данная разбивка сита на сектора выбрана для удобства оценки характеристик течения пара. В таблице приведен расход пара через сектора сита в процентном соотношении к общему расходу пара через клапан. По полученным результатам можно отметить, что на первом секторе наблюдается наибольший расход пара через сито. Это можно объяснить тем, что мощность турбины на этом режиме составляет 30 % от номинальной. При этом основное сопротивление течению пара наблюдается в РК1 (рис. 3). Площадь суммарных проходных сечений на сите в 3 раза больше чем в РК1. Если сопоставить левую и правую части сита, то можно наблюдать асимметрию массового расхода, вместе с тем отличие для данных секторов составляет 4 %. Это объясняется тем, что в рассмотренном варианте открыт только один регулирующий клапан РК1.

В развернутом виде на плоской поверхности представлен массовый расход пара через сито (рис. 4). По этим данным можно отметить значительную неравномерность массового расхода пара, как по высоте, так и по периметру сита. Эта неравномерность имеет сложную геометрическую форму. Отметим четыре области 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 (рис. 4), где пар не проходит через сито. Зоны 4.1, 4.4 имеют разную форму и площадь. Это обусловлено образованием двух вихрей в задней части камеры парового сита (рис. 5). Вихри имеют несимметричную форму, как следствие открытия только РК1. Это приводит к разной форме зон.

Зоны 4.2, 4.3 симметричны и вызваны увеличением скорости пара между секторами 6–5 и 2–3 (рис. 2). Течение пара в областях 6.1, 6.2 (рис. 6) симметричны, а в центральной части каждого среза скорость падает на 10 м/с.

Следует отметить, что за ситом давление пара выравнивается (рис. 7, 8). Есть незначительное увеличение давления на 0,02 МПа в области 7.1 (рис. 7) напротив входного патрубка. В зонах 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, где сито не пропускает пар, перепад давления на сите отсутствует, т.к. при увеличении скорости давление падает. Можно сказать, что сито не только фильтрует паропоток (задерживает твердые частицы), но и обеспечивает относительную равномерность прохождения пара в клапане. При этом усредненный перепад давления пара на сите составляет 0,04 МПа.

### **Выводы**

Выполнены численные исследования течения пара через сито в системе парораспределения паровой турбины К-325. Выявлена значительная неравномерность распределения массового расхода пара на сите. Отмечается незначительное влияние на его течение разное открытие регулирующих клапанов РК1, РК3. Учитывая небольшую асимметрию распределения массового расхода на сите, задачу течения пара в камере с ситом, без регулирующих клапанов, можно решать в осесимметричной постановке. Установлено, что сито не только фильтрует паропоток (задерживает твердые частицы), но и обеспечивает относительную равномерность прохождения пара в клапане. На основе полученных данных о распределении массового расхода и перепаде давления пара на сите представляется целесообразным использовать пористую модель сита, позволяющую учесть основные особенности прохождения пара через него при решении многовариантных или нестационарных задач течения пара в регулирующих клапанах.



Рис. 2 – Камера сита и входной патрубков

Таблица

№ сектора	Расход пара, %
1	28,7
2	16,82
3	14,82
4	13,62
5	12,94
6	13,1

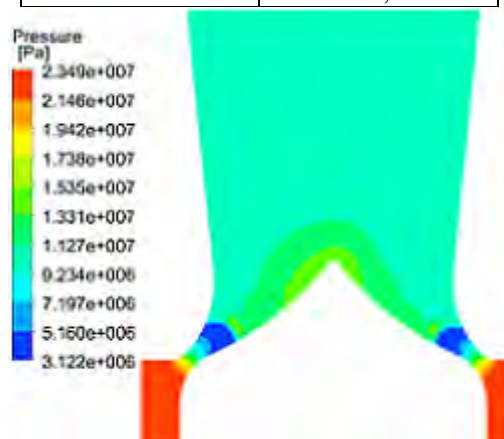


Рис. 3 – Перепад давления на РК1

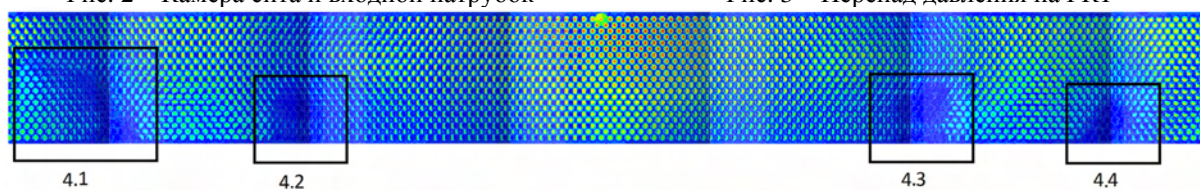


Рис. 4 – Расход пара через сито

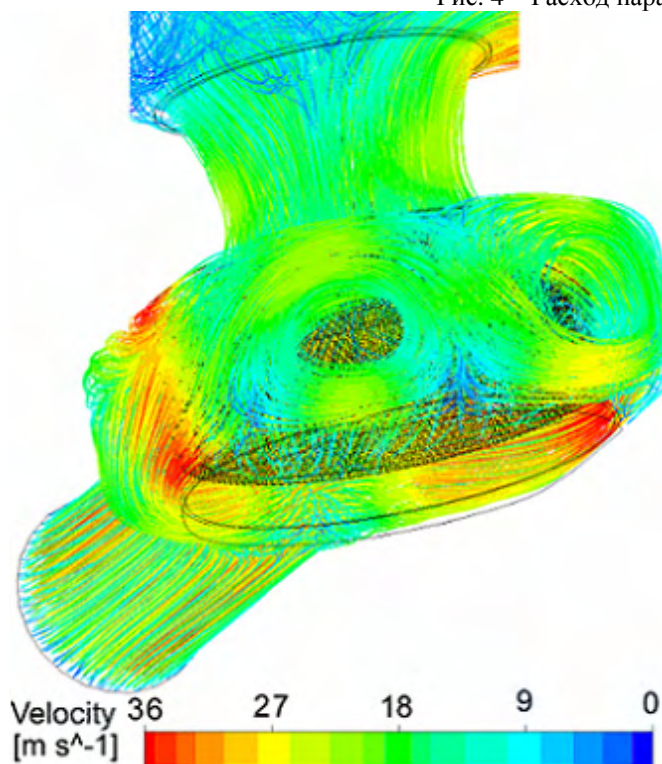


Рис. 5 – Линии тока пара

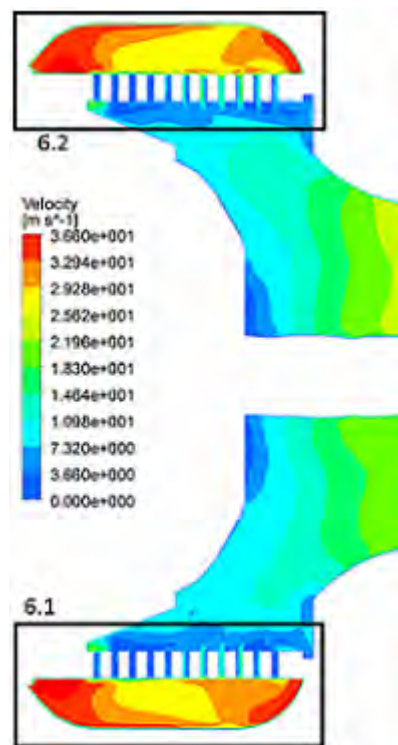


Рис. 6 – Скорости пара в сечении X



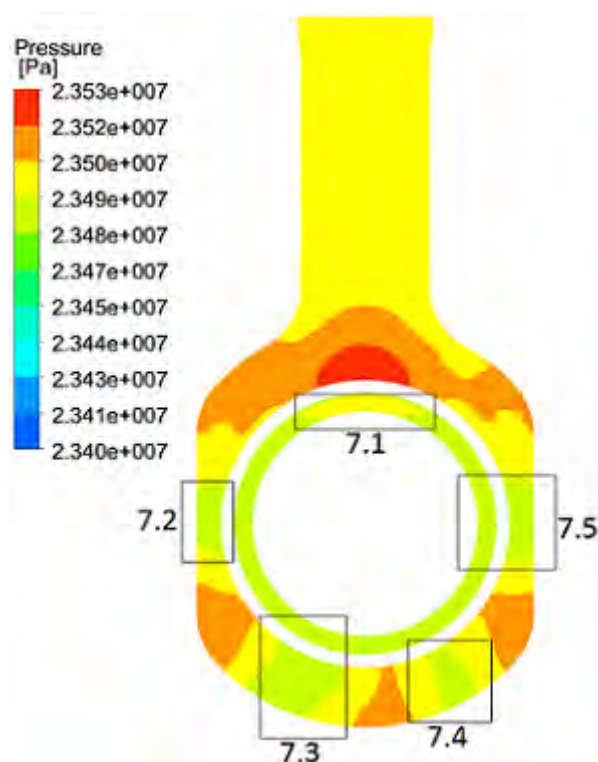


Рис. 7 – Давлення пара в сеченні Z

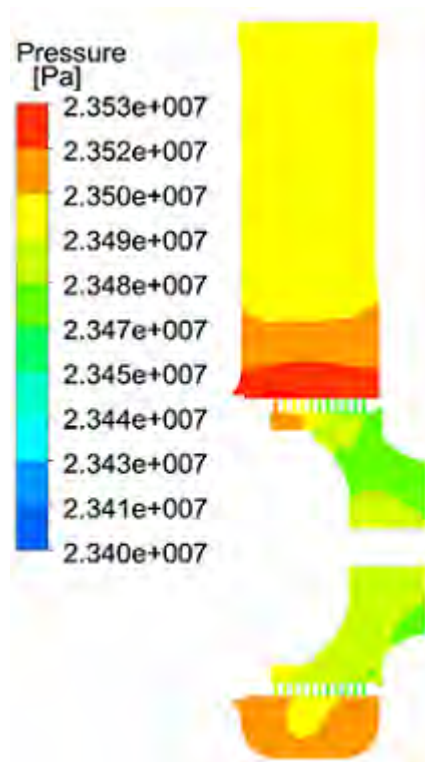


Рис. 8 – Давлення пара в сеченні X

**Список литературы:** 1. Колядюк, А.С. Численное моделирование течения пара в регулировочном клапане турбины [Текст] / А.С. Колядюк, Н.Г. Шульженко, И.Н. Бабаев // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 2. – С. 106-110. – ISSN 1727-0219. 2. Колядюк, А.С. Течение пара и распределение температуры в системе парораспределения турбины для различных режимов ее работы [Текст] / А.С. Колядюк, Н.Г. Шульженко, С.В. Ершов // Вестник двигателестроения. – 2012. – № 2. – С. 94-101. – ISSN 1727-0219. 3. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. ANSYS CFX Release 11.0 / ANSYS, Inc. // Southpointe 275 Technology Drive. – Canonsburg: PA 15317, 2006. – 312 p. 4. Menter, F.R. Eddy Viscosity Transport Equations and their Relation to  $k-\omega$  the Model [Text] / F.R. Menter // NASA Technical Memorandum 108854. – November. – 1994. 5. Menter, F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications [Text] / F.R. Menter // AIAA J. – 1994. – 32, № 8. – P. 1598-1605. 6. Белов, И.А. Моделирование турбулентных течений [Текст]: учеб. пособие / И.А. Белов, С.А. Исаев. – СПб: БГТУ, 2001. – 107 с.

Поступила в редколлегию 10.01.13

УДК 629.735

**Анализ течения пара через сито регулирующего клапана паровой турбины К-325 на стационарном режиме работы** [Текст] / А.С. Колядюк, Н.Г. Шульженко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 14(988). – С. 19-23. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X.

Розглядається течія пара в системі паророзподілу на основі числового розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса. Визначаються характеристики течії пара. Застосовується модель турбулентності SST Ментера. Встановлено основні особливості течії пари через сито і в камері, де воно встановлено.

**Ключові слова:** розрахунок, течія пара, система паророзподілу, турбіна.

It is considered the flow of vapor in steam distribution system based on the numerical solution of Navier-Stokes equations. It is determined the defining characteristic of vapor flow. The Menter SST turbulence model is used. It is calculated the main features of the vapor flow through the screen and in the chamber, where the screen is installed.

**Keywords:** calculation, flow of vapor, steam distribution system, turbine.